第 39 卷　第 4 期　2021 年 12 月
天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY
Vol. 39,　No. 4　Dec., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.04.03

Thorne-Żytkow Objects 观测和研究进展

刘剑宇，张　帆

(北京师范大学 天文系，北京100875)

摘要： 近期，引力波探测揭示了诸多超乎意料的双星并合事件，显然对于“双星演化”这个最基础的天体物理问题的理解仍然有很大欠缺。弥补这个缺陷的努力不能仅局限于依赖双星并合这样的稀缺瞬时事件，必须同时寻找其他独立的、更适合长时间观测的线索和现象。Thorne-Żytkow Objects (简称 TŻO) 作为假想的、在红巨星或红超巨星内部沉入一个衰退的中子核的奇妙天体，即是能够帮助理解双星演化的一个绝佳研究对象。首先从理论上统述大质量 TŻO 的结构与演化；然后主要介绍大质量 TŻO 在观测上的相关发现，尤其是在小麦哲伦星云中的 HV2112；最后主要对当前的相关工作进行总结和展望。

关　键　词： Thorne-Żytkow Objects；中子星；致密双星演化；红巨星；红超巨星

中图分类号： P153　　　**文献标识码：** A

1　引　言

Thorne-Żytkow Object (简称 TŻO) 最初是由 Thorne 和 Żytkow 两人共同在理论上提出的一种天体[1]。根据理论推测，在一颗红巨星或红超巨星的中心有一颗简并的中子星核 (而在普通的红巨星或红超巨星中不会存在中子星核，这也是 TŻO 区别于普通的红巨星和红超巨星的特征)。然而，虽然 TŻO 与红巨星和红超巨星有区别，但无论是在化学元素丰度还是光谱上其性质都与红巨星或红超巨星有很多相似之处。对于 TŻO 形成的可能性，许多研究者提出了不同的模型和结论。目前普遍认为，TŻO 能在两种不同的环境下形成：(1) 在一个球状星团内，一个中子星与一个正常演化的天体 (矮星或巨星) 发生直接碰撞，导致两个天体相互俘获并结合成一个天体，而碰撞的起因可能是由于双星系统不稳定的质量转移，亦或是双星系统中一颗恒星先演变到超新星爆发阶段，在此阶段中由于超新星爆发作用是不

收稿日期： 2021-02-02；　**修回日期：** 2021-03-01

资助项目： 国家自然科学基金 (12073005, 12021003, 11503003, 11633001)；北京师范大学交叉学科平台项目

通讯作者： 张帆，FnZhang@bnu.edu.cn

对称的，因此最终形成的中子星受到超新星爆发的作用推向另一颗天体并相互俘获并合[2]。(2) 在大质量 X 射线双星系统中，正常的大质量恒星的演化可能会使它吞噬中子星伴星，产生一个共同包层，逐渐旋进并最终完全并合。前者能够产生小质量 TŻO，而后者则会产生大于 $14M_{\odot}$ 的大质量 TŻO[3]，而在这两个质量界限之间 ($8.5M_{\odot} \sim 14M_{\odot}$) 会产生一个比较大的间隔，目前的模型还不能完美地解释此间隔的产生。不少研究人员针对这两种环境提出了不同的具体形成和演化机制。

在观测方面，由于 TŻO 与红巨星或红超巨星有着非常相似的性质，因此它很难通过其直观的特点被直接确认为候选体。而快质子俘获过程 (rp-process) 和慢中子俘获过程 (s-process) 产生元素的不同为观测上寻找 TŻO 候选体提供了方法。目前观测到的最受关注的 TŻO 候选体是在小麦哲伦星云 (SMC) 中的 HV2112[4]，而它成为候选体的理由主要也是通过与普通红超巨星的元素丰度对比而提出的。除了 HV2112，还有一些其他的 TŻO 候选体和可能经历过 TŻO 演化阶段的天体。

第 2 章主要着重于从理论上统述大质量 TŻO 的结构与演化，包括恒星结构演化中几种重要的核过程，以及大质量 TŻO 的形成和其演化的不同可能结果及其相关过程。第 3 章主要注重于大质量 TŻO 在观测上的相关发现，包括可能为大质量 TŻO 演化过后的遗迹，尤其是在小麦哲伦星云中 HV2112 的化学性质，并对其通过不同的学说进行了解释分析。第 4 章主要对当前的相关工作进行总结，并对未来进一步的研究方向提出展望。

2 结构与演化

2.1 重要核过程

理论上，初始质量足够大星体的稳定燃烧阶段，最多能够通过核合成产生直至 Fe 峰 (iron peak) 的元素；而比 Fe 更加重的核素，因为其平均结合能比 Fe 低，所以是不能通过稳定燃烧的核合成生成的，而是通过快中子俘获过程 (r-process)、慢中子俘获过程 (s-process)，或快质子俘获过程 (rp-process) 来产生。

(1) 慢中子俘获过程 (s-process)

慢中子捕获过程是天体物理中在星体上发生的一系列核合成反应中的一种，特别是发生在 AGB (渐进巨星支) 上。s-process 创造了星体中大约一半的比 Fe 重的元素，在星系化学演化中占据非常重要的地位。在 s-process 中，原子的核心进行中子捕获的速率低于 β 负衰变的速率。处于稳态下的同位素捕获中子，但是产生的放射性同位素在另一次中子捕获前就衰变为稳定的原子核，这样经由 β 稳定的过程，使同位素沿着同位素列表的槽线移动。

(2) 快中子俘获过程 (r-process)

快中子捕获过程是在核心发生坍缩的超新星或双中子星并合环境中创造富含中子且比 Fe 重的元素的过程，同样创造了大约一半的重于 Fe 的元素。需要以 Fe 为最初的核进行连续的快中子捕获。r-procss 是由爆炸核合成产生的，例如在核坍缩超新星或双中子星并合后，有高温以及大量的中子通量，因此中子捕获过程的速率比 β 衰变速率快并且稳定，这

意味着 r-process 沿着中子滴线进行。

(3) 快质子俘获过程 (rp-process)

快质子俘获过程是一连串的质子被初始核捕获形成重元素的过程。其结合了 s-process 和 r-process 特点的核合成过程，rp-process 能够合成最重的元素，虽然其反应终点以现有知识还不能确定。rp-process 需要非常高的温度和富含 H 的环境，其最初的原子核可能在 CNO 循环期间产生。

可能进行 rp-process 的场所一般被认为处于有致密伴星 (小质量的黑洞或中子星) 的双星系统中，在包含剧烈吸积过程的地点。在这些系统中，通常另外一颗天体是诸如红巨星这种具有富氢大气的天体。这个系统中的恒星 (通常是红巨星) 供应致密星体吸积所需要的物质，由于这些物质来自共生恒星的表面，因此富含 H 与 He，同时由于致密星体的强引力场，物质会以高速落向这颗致密星，而在此过程中通常会与其他物质碰撞形成吸积盘。这样的情况下物质会在伴星表面累积并有极高的温度，成为电子简并物质。由于电子简并物质在高热的大气中会达到开尔文-亥姆霍兹不稳定 (K-H) 的状态 (主要用于描述线性气流的不稳定性)，在这种不稳定的状态下温度的增加将会引发热核爆炸，产生 rp-process (见图 1)。

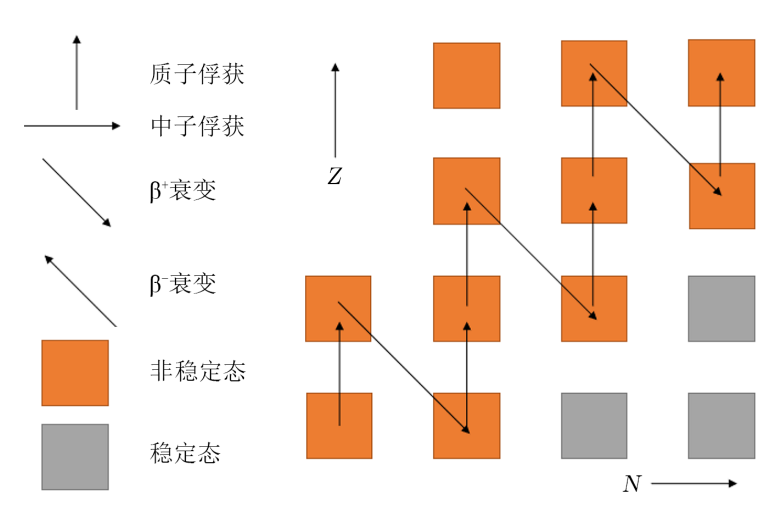


图 1 快质子俘获过程

综上所述，对于 s-process，通常认为在恒星进行 He 燃烧的时候，在高能中子相对富集的地方，就能够产生 s-process 所能产生的元素；而 rp-process 则是在高能质子相对富集的地方，通常认为是在有致密伴星的双星系统中产生。TŻO 的平衡结构会产生快质子俘获过程中能够产生的元素，而在红巨星中并没有这一过程的发生；因此能够在 TŻO 上找到相应的元素丰度的显著提升，这就为区分 TŻO 与红巨星提供了方法。

接下来主要统述大质量 TŻO 的相关理论，包含其形成、演化过程以及最终可能的结局分析。为全面和公正起见，本章并不仅限于介绍支持 TŻO 的理论，同时还介绍了相关的不支持 TŻO 形成的理论。同时在本章开始之前会先做一个定性，以方便后续的定义：将大质量 X 射线双星系统中率先演化到中子星阶段的星体的伴星称为胖星。

2.2 TŻO 的诞生

II 型超新星又叫核坍缩超新星，是大质量恒星坍缩引发的剧烈爆炸结果。II 型超新星又能通过爆炸后的光变曲线被划分成不同的类型。II 型超新星的光谱通常都会展现出巴尔末吸收线，而这常用来区分 II 型超新星与 I 型超新星。

IIP 型超新星：是 II 型超新星中的一种，其特点是光变曲线在下降时会有一个显著的平滑结构，这代表在一段时间内，亮度以一个比较缓慢的速率下降。

IIn 型超新星：具有一个特征，即其氢谱线的宽度相对比较狭窄。

大质量 TŻO 主要是在大质量 X 射线双星系统中形成的[5,6]。在一般情况下，当系统中的大质量主星完全充满洛希瓣时，质量转换速率会以几个数量级的大小超过中子星的爱丁顿吸积率。因此，双星系统中的大部分质量无法完全被中子星吸收，而超出的质量会在中子星周围形成延伸的包层，最终充满中子星的洛希瓣。这时大质量 X 射线双星系统会演化到共同包层阶段，中子星会被胖星的包层所吞并，由于气体阻力的作用，向着系统的中心旋进。在大质量 X 射线双星演化过程中的第一种情况下，在此过程中轨道能量释放得足够多，使得双星的共同包层被完全喷射出，并留下一个距离非常相近，周期为 3 或 4 h，包含一颗大于 3 的 He 核燃烧的胖星和一颗原始的中子星。观测发现胖星可能进一步发生超新星爆发并留下一个中子星残骸，同时在这个过程中并没有破坏整个双星系统，并最终演化为距离非常相近的双中子星，这一演化过程说明，一些大质量 X 射线双星能够在经历共同包层旋进过程的演化进程时避免并合。TŻO 的形成过程见图 2。

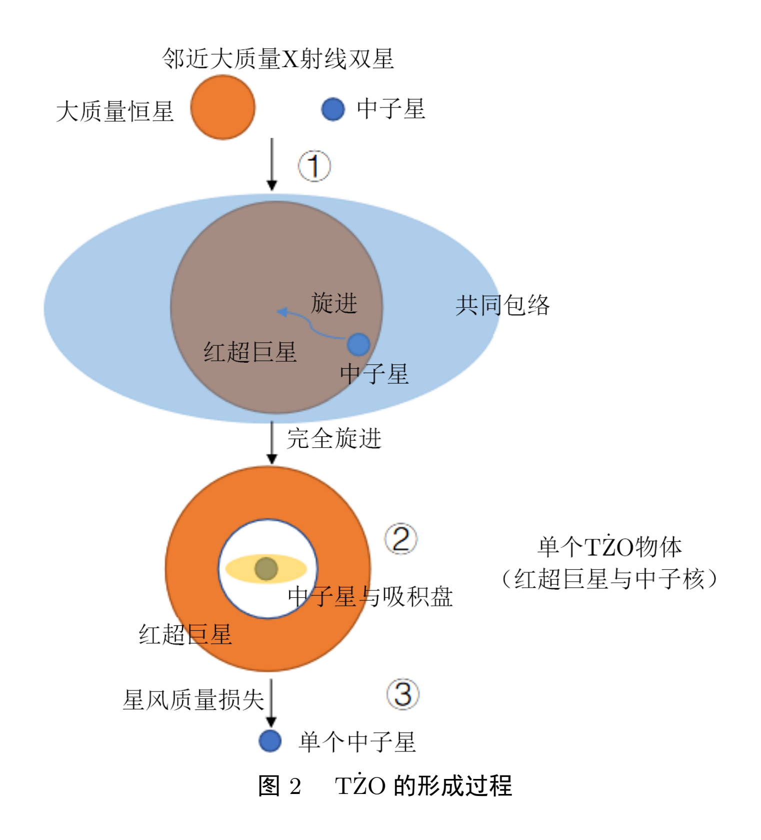


图 2　TŻO 的形成过程

但在 TŻO 的研究中感兴趣的是那些并合了的系统，在大质量 X 射线双星演化方式的第二种情况中，能量不足以将共同包层喷射出，那么中子星会进入中心并旋进，最终系统形成 TŻO。对比这两种不同的系统，前者更可能成为双中子星的前身，而在后者的系统中更有可能发生完全并合并形成 TŻO。

而在另一种形成 TŻO 的方式中 (见引言部分)，发生在超新星爆发后，中子星受到不对称的超新星爆发的作用，使得双星系统直接并合。

对 TŻO 的早期研究给出了两种结构：分别是巨星和超巨星作为外层，满足包层质量不超过 $8M_\odot$ 或不小于 $14M_\odot$[1]。巨星能量的 97% 来自于核心对包层的吸积，而超巨星能量的 95% 来自于对流包层上的核燃烧。对比核心的吸积和表面质量的流失，前者会起到主要作用，因此 TŻO 的寿命主要取决于它们消耗共同包层的速度，当 TŻO 损失掉共同包层后，它们会留下一个单独的中子星或黑洞遗迹。在双星系统形成机构理论中，普遍认为在旋进阶段结束后，中子核上方的物质会不断地被中子核吸积，并有足够的角动量使中子星自旋加速到毫秒周期，因此，如果遗留下来的是一个快速自转的中子星，那可能是毫秒脉冲星。而这一过程的机制是否能够产生单独毫秒脉冲星主要取决于吸积的质量有多少，以及在旋进阶段后包层内角动量的再分布。

2.3 TŻO 的终结

大质量 TŻO 主要通过在中子核附近的快质子俘获过程 (rp-process) 来支撑它们的包层，因此 TŻO 能以带有特殊化学丰度的红巨星或红超巨星的形式被观测到。例如 HV2112 就被认为是大质量 TŻO 的候选体，由于它异常的化学现象符合理论预测 (但也有不少研究提出了不同的可能性，在本文中也将特别指用 TŻO 来解释 HV2112 的一些缺陷)。当大质量 TŻO 的 rp-process 的初始元素耗尽及质量流失使 TŻO 低于维持快质子俘获过程反应所需要的质量时，TŻO 的结构就不再稳定，会发生坍缩，最终大质量 TŻO 最终会爆炸，结束其短暂的一生。

具体而言，在中子核表面的核燃烧结束后，表面的物质将会继续收缩，同时温度会不断升高，释放出中微子并造成能量的流失。由于中微子的有效冷却，向中子核的吸积不再受爱丁顿率的限制，转而取决于自由落体吸积率。相关研究认为在 TŻO 包层中的有效对流会使 TŻO 自转非常快[7,8]，当离心力开始占据主导地位时，自由落体吸积率相应地被抑制了。在这个时间点，约 $10^{-3}M_\odot$ 的质量已经被吸积到中子核上，但中子核还没有坍缩成为黑洞。一个薄的吸积盘将会在中央的中子核处形成，随后的吸积时间将由吸积盘中不确定的粘度决定，然而即便如此，在保持超爱丁顿吸积的情况下[9]，吸积率仍然远大于 $10^{-3}M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}$。与此同时，在这一阶段中子核处的吸积盘会引发大范围喷流。如果超爱丁顿吸积继续下去，在塌缩后的几月或几年后，大约 $1M_\odot$ 的物质会被吸积到中子星核上，这时中心的中子核会坍缩成为黑洞，如果此时吸积盘依然存在，那么超爱丁顿吸积依然存在并会继续产生大范围喷流。

随后 TŻO 会进入爆炸阶段，对于典型的大质量 TŻO，它们的结合能大约在 10^{40} J 数量级。例如，对于一个质量为 $16M_\odot$、中子核为 $1M_\odot$ 的 TŻO，其结合能为 5×10^{40} J。由于

在 TŻO 坍缩过程中，中心的致密物体附近可能会形成一个超爱丁顿吸积的吸积盘，这个吸积盘会发射大范围的喷流，同时由于 TŻO 的结合能很小，这些喷流很容易被推回到坍缩的 TŻO 中并引发爆炸。TŻO 爆炸后的观测性质很大程度取决于吸积盘所释放出的能量，而爆炸会产生几种不同的可能猜测结果。

如果吸积在结合能 (10^{40} J) 释放之后的短时间内被抑制了，那爆炸的能量不会超过 10^{40} J，这个爆炸可能会以一个低能量的 IIP 型超新星爆发的形式被观测到。如果采用 Kasen 和 Woosley[10] 的理论，最高的热光度预计能到 −7.1 mag 并持续约 900 d。由于此光度与祖星的光度相当，TŻO 看起来可能像是还没有发生爆炸就消失了。而爆发的能量与那些失败的超新星爆发[11] 的能量类似，因此一个低能量的超新星爆发可能会与 TŻO 爆发相混淆。如果 TŻO 周围包含稠密的星际介质，那么发射的物质会与稠密的星际介质相互反应，这可能会被认为是低光度的 IIn 型超新星爆发。目前观测到的 II 型超新星爆发并不排除有可能是低能量 TŻO 爆发的产物，具体需要进一步分析其遗迹中的化学丰度。

但如果吸积没有被抑制而吸积盘上的星风依然存在，那么吸积盘能够释放更大的喷流，这些喷流会使得 TŻO 的能量爆发更高，其爆炸的能量就能达到甚至超越超新星爆发的能量。假设吸积以一个标准的能量转换效率流失，那么爆发产生的能量最高能到达 10^{46} J，这与大型 II 型超新星或富氢超光度超新星爆发所产生的能量相近。这个爆炸会造成黑洞的形成，随着黑洞的形成，一个强烈的喷流会随之产生，爆炸的 TŻO 可能会以极长的 γ 射线暴的形式被观测到[12]。如果喷流能够穿透包层，也可能会产生瞬态的超光度超新星爆发。

星系中的 TŻO 产生率大约为 2×10^{-4} a^{-1}[8]，而在星系中 TŻO 爆炸的比率接近于产生率。按照比率计算大约每 10 000 个超新星爆发中就可能有一个 TŻO 爆发，与超光度超新星爆发的比率相当。由于 TŻO 爆发产生的预计能量可能与超新星爆发相近，因此想区分 TŻO 爆发和超新星爆发是一个很棘手的工作。区分这两者的最有效方法在于甄别两者的金属性，超新星晚期会通过其祖星的核中产生强烈的金属线，而 TŻO 不会产生如此强烈的金属线。另外，大质量 TŻO 中特有的丰度含量也可能会成为一个重要的线索。

如今只有很少的 TŻO 候选体被发现，这表明 TŻO 如果真的存在，其寿命会非常短暂。可能是由于质量的大量流失，TŻO 过早到达了能够产生 irp-process (间断的快质子捕获过程) 的质量下限，当 TŻO 低于质量下限后，irp-process 会终止进而结束 TŻO 过程。如果质量流失是造成 TŻO 中 irp-process 终止的主要原因，那么相应的 TŻO 的爆发应当更加普遍，由于 TŻO 爆发的特殊性，这也需要进一步的观测，特别是对于 II 型超新星爆发所产生遗迹的化学特征。随着 TŻO 的爆发，会有大量的特殊元素进入星际，因此这可能是宇宙的化学演变中非常重要的一部分。

2.4 对 TŻO 形成理论的挑战

对于 TŻO 的形成与演化一直存在着不同的模型与观点。Papish 等人[13] 认为，如果来自中子星的吸积能够超过爱丁顿率，大量的吸积能量会直接传入喷流中，并吹散巨星的包层，因此 TŻO 不能通过共同包层的方式形成 (见图 3)。此理论采用了喷流反馈模型[14−16]，即喷流沉积的能量会使整个包层以及一部分核心物质被发射出去，并在共同包层演化的最后阶

段出现喷流与核心物质的强烈相互作用。而针对具体观测候选体 HV2112，这个观点认为其不是一个 TŻO，因为其形成演化的过程并不能真实存在。

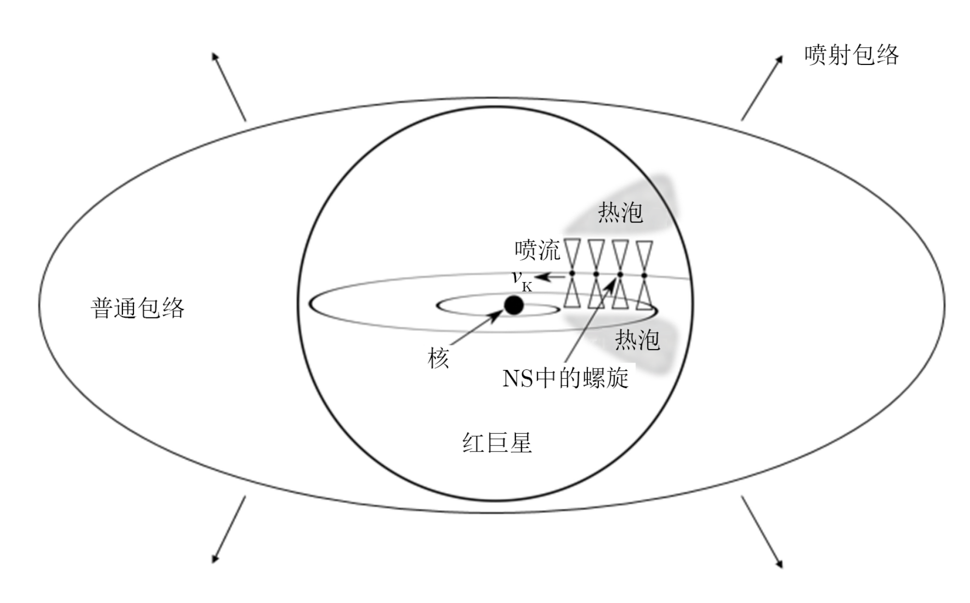


图 3　TŻO 无法通过共同包层形成的理论[17]

通过确定快中子俘获过程 (r-process) 核合成的具体发生地点，可以获得支持这个论点的一个可观测证据。A⩽130 的元素诞生于比较强烈的快中子俘获过程，而对于这个过程的发生地点有两种不同的观点[17]，一种认为是在双中子星并合中产生的[18]，而另一种则认为是新生的快速旋转的中子星所发出的喷流中产生[19]。具体而言，在最初的中子星与红超巨星的研究中，Taam 等人[20] 认为当中子星旋进进入红超巨星包层的时候会有两种结果，包层会喷发并且核心与中子星合并，但这并没有考虑到喷流的作用。

而现在认为中子星的强吸积作用会产生喷流。一种模型认为大量的 r-process 的元素会在中子星产生的喷流中形成，并在共同包层的演化中使得星体爆炸。另一种经典的模型基于快速旋转的核会使得磁场放大的磁旋转机制[21−23]，这个机制会在新生的中子星附近产生两极喷流，这也会使得星体爆炸；但这一模型要求的恒星自转速率远大于恒星演化模型所给出的自转速率，所以这个模型只适用于一些很特殊的情况。

综上所述，当中子星旋进进入红巨星的核心并发射出喷流时，强烈的 r-process 核合成过程也可能出现，这些喷流会使能量堆积在包层内并最终使整个星体爆炸。这是一种较为罕见的演化路线，并与大量的有关这些元素被发现的事实相吻合。中子星在与红超巨星旋进的过程中，吸积率非常大，远超过爱丁顿吸积率，因此大量积攒的能量进入包层；同时旋进的中子星会释放喷流并将包层驱散掉，一个星体核心处在这样的情况下有可能无法通过共同包层的演化路线形成 TŻO。

3 观　测

3.1 可能的TŻO爆发后的遗迹

2015 年 Liu[24] 发现了一个周期为 6.67 h 的 X 射线源 1E161348-5055，处在年轻的超新星遗迹 RCW103 中。这是一个非常有趣的发现，因为此遗迹可能是 TŻO 演化而来的。一个 TŻO 在形成过程会经历这样一个阶段：一个快速自转的中子星核和一个缓慢旋转的包层阶段，理论认为通过中子星核的磁场与包层之间的演化，中子星核能够减速并以一个极大的周期旋转，而包层可能会被蕴含巨大能量的爆发或星风给驱散掉。如果在中子核减速后包层被驱散掉，那将会留下一个极长周期的致密天体，被包含在一个类似于超新星遗迹的外壳中以非常小的速度径动，而这些特点都符合 1E161438-5055。而 TŻO 应当会富含极高丰度的 Li 以及 rp-process 元素，这些元素会留在遗迹中，能够帮助检验这个演化过程的正确性。

这个 X 射线源 1E161348-5055 位于超新星遗迹 RCW103 的中心，在 X 射线波段具有极强的光度，但在射电、红外以及光学波段并没有发现明显的能量，而最耐人寻味的是它 6.67 h 的自转周期，而造成这一原因的猜测有如下几个：

(1) 由于小质量双星系统中有一个光度极低的次级伴星，这一伴星具有极低的 X 射线光度，轨道周期为 6.67 h[25,26]。但这很难解释这一对相距极近的双星是如何在超新星爆发中存活下来并能屏蔽掉大量波段的观测。

(2) 1E1613 是一颗磁星[27]，并由于自由落体盘的作用减速到一个长的周期。但这一演化方式与所有已知的磁星候选体、不规则脉冲星在观测上都不相同，这些天体的自转周期都在 2 ~ 12 s 内，远小于 6.67 h。

(3) 1E1613 是 TŻO 演化的致密核，它在演化过程中自转周期下降到了非常长的周期。

TŻO 致密核的减速：在之前的理论中，只考虑了吸积物质过程中的角动量，没有考虑中子核磁场和包层之间的相互作用。由于包层是对流且高电离的，其中的等离子体会对磁场自转产生相互作用。在 TŻO 包层中，在靠近中子核的地方，磁场会变得足够大使得等离子体随着中子核共同运动。这一过程可能在TŻO 完全形成之前就已经开始了，在中子星通过包层旋进伴星中心的过程中，磁场与等离子体相互作用，同时物质被星体吸积会产生相反的扭矩，总的扭矩由磁场和物质的吸积共同决定，使得致密天体在旋进的过程中就已经开始减速。

TŻO 包层的瓦解：包层会被星风耗散，或是在中子核转变为黑洞之前由于一些巨大能量的爆发所瓦解。中子核进而能以一个缓慢速度自转，并在一个类似超新星遗迹中的中心被观测到。

总之，1E1613 的形成过程可能是一个大质量双星系统经历了一次超新星爆发，产生了 RCW103 和一颗致密星，这颗致密天体受到合适的超新星爆发的作用直接与其伴星结合成为了 TŻO；接着致密核自转减速，而其包层被星风或爆发所驱散；最终包层与 RCW103 超新星遗迹相结合，而核则成为 1E1613。假设 RCW103 真的经历了 TŻO 的过程，那么它的径动应该非常小，这与观测相符。另一方面，RCW103 作为 TŻO 的遗迹应该会与正常的

SNR 遗迹有所不同，因为在 TŻO 阶段产生的 rp-process 元素应该还留存在遗迹中，这有待未来的观测检验。

3.2 TŻO 候选体 HV2112

3.2.1 HV2112 的性质

在 TŻO 观测领域最振奋人心的是对于 HV2112 的观测。在大质量 TŻO中，对流包层几乎到达中子星的表面，因此极高温的 H 燃烧会通过 irp-process 合成质子数很高的元素。然而由于 TŻO 的产生率非常低，同时它们的寿命又非常短，因此在观测上 TŻO 能否存在也是一个问题。

HV2112 是 TŻO 的第一颗观测候选体，对于它的距离一直有不同的解释，而这些不同距离又引发了不同的假设。对于 HV2112，其成为一颗 TŻO 候选体的前提取决于它是小麦哲伦星云 (SMC) 中的一员[28]。早期有工作认为 HV2112 若在 SMC 中，自行速度会达到 3 000 km·s^{-1}，远超过 SMC 的逃逸速度，他们认为 HV2112 更有可能是银河系银晕上距离约为 3 kpc 的星体[29]；这意味着其没有足够的光度成为一颗红巨星，更不用说 TŻO 候选体了。而在后续的研究中证实 HV2112 是 SMC 中的一员[30]，并且符合 SMC 中东翼的子结构，SMC 的东翼有星体诞生于 50 ~ 200 Ma 之间的证据，有着与 HV2112 相联系的年轻的致密天体；并且 HV2112 的径动速度 (157 km·s^{-1}) 与 SMC 的径动速度 (145.6 km·s^{-1}) 很符合，同时 HV2112 的视线径向速度约为 13 km·s^{-1}，与晕星和 SMC 都相符。而在 2MASS 颜色量级图表中清楚地表明 HV2112 位于 SMC 中 M 型超巨星范围。将上述信息整合，坐标位置、自行、径向速度都很符合 SMC，并且光学测量显示其处在 SMC 超巨星范围，这也是 HV2112 为 SMC 中一员的有力证据。通过研究 Gaia 的二期数据也证实 HV2112 的自行完全符合它是小麦哲伦星云中的一员，同时视线速度也符合，这一观测数据排除了所有关于 HV2112 在太阳几 kpc 内的演化学说。

TŻO 代表了一个全新的恒星结构理论，其相关 irp-process 更是一个创新的恒星内部的核反应模型。目前还没有一个非常好的办法能够从外观区分 TŻO 和普通的 M 型红超巨星，在观测上能用来区分的特征只有他们的大气化学元素丰度。由于中子星核与完全对流的包层之间的接触面上具有极高的压强，irp-process 会产生很多不同寻常的化学元素丰度[3]，尽管红超巨星的谱线大部分由氧化锑 (TiO) 的吸收线所占据，一些特殊的irp-process的产物应该还是能够在 TŻO 的大气表面被观测到，其中包含 Rb I, Sr I ，Sr II, Y II, Zr I, Mo I[1]，除此之外，Li 的丰度在 TŻO 中也应该大量地超过正常值。

3.2.2 HV2112 为 TŻO 的论点

在对 HV2112 的研究中[4]，红超巨星的大气模型会受到诸如大气几何学、光深的变化、质量损失效应以及宿主星系的化学丰度变化的影响。为了避免这些大气模型的假设所带来的偏差，各种研究相应地截取了感兴趣的化学元素的光学谱线的等效宽度比。为了在光谱中找寻类似 TŻO 的不同寻常的元素丰度，将 Li, Rb 以及 Mo 这些在 TŻO 中被认为会显著增加的元素丰度谱线特征，与那些被认为在 TŻO 中不会显著增加的元素丰度，如 K, Ca, Fe, Ni 这些元素相比较。

在比较宿主星系中红超巨星的 TŻO 元素的比例时，小麦哲伦星云中的 HV2112 被发现在 Rb/Ni, Li/K, Li/Ca 和 Mo/Fe 上具有异乎寻常高的比率。

图 4 给出了在 SMC (小麦哲伦星云) 中包含 HV2112 在内的所有样本，与正常的 Ni/Fe, K/Ca 比率相结合并进行分析，能够清晰地得出 Rb, Li 以及 Mo 在 HV2112 的大气中具有非常明显的提升。在此图中，样本都在 SMC 中，横坐标为有效温度，纵坐标为元素之间的比率值，这些比率包含 TŻO 中应该显著提高的比率以及控制变量的比率。深色线展示了对于各个元素，其对应不同的有效温度，其比率最符合观测的拟合值线。在光谱中 HV2112 的比率被标记为红色。

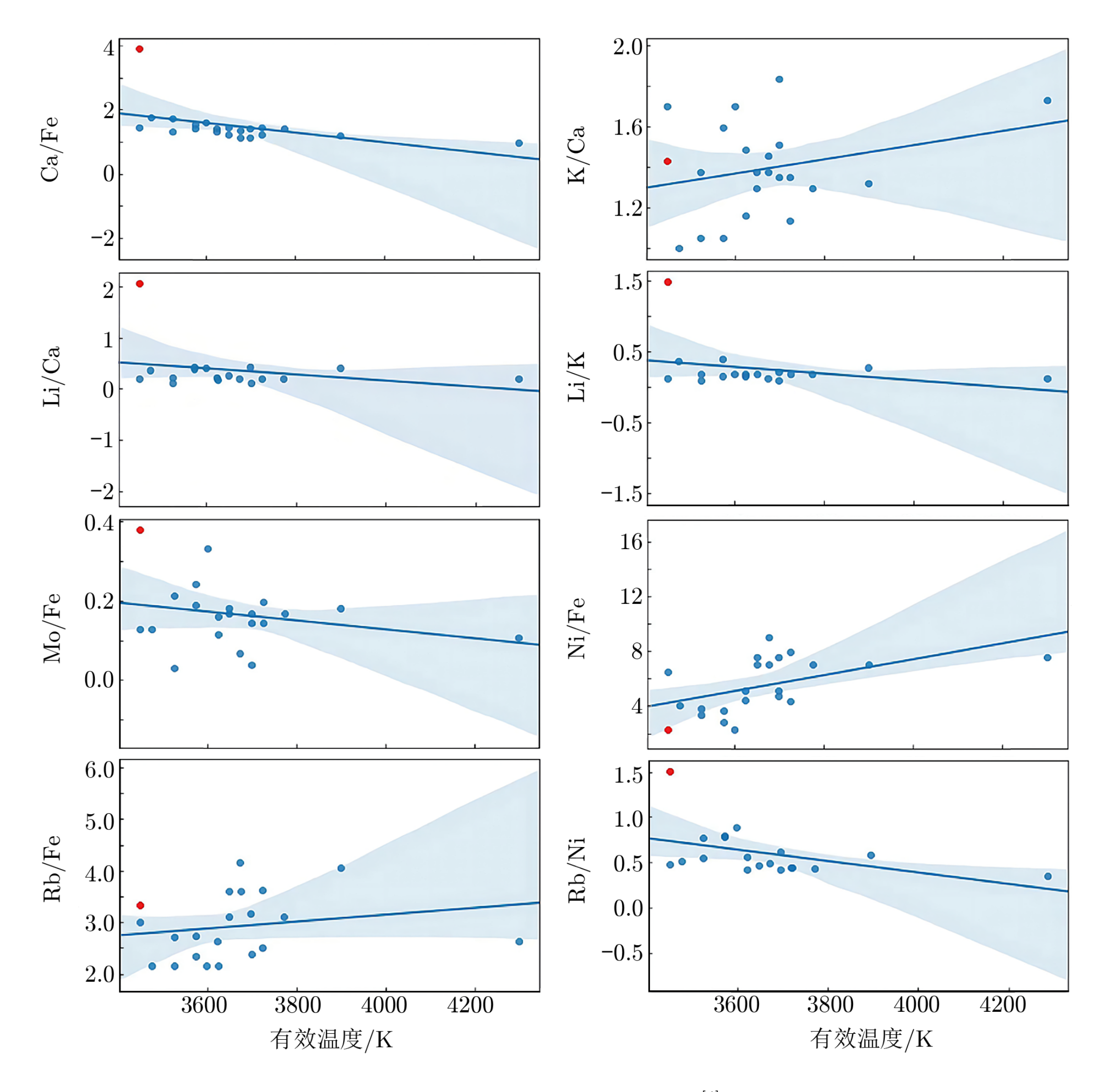
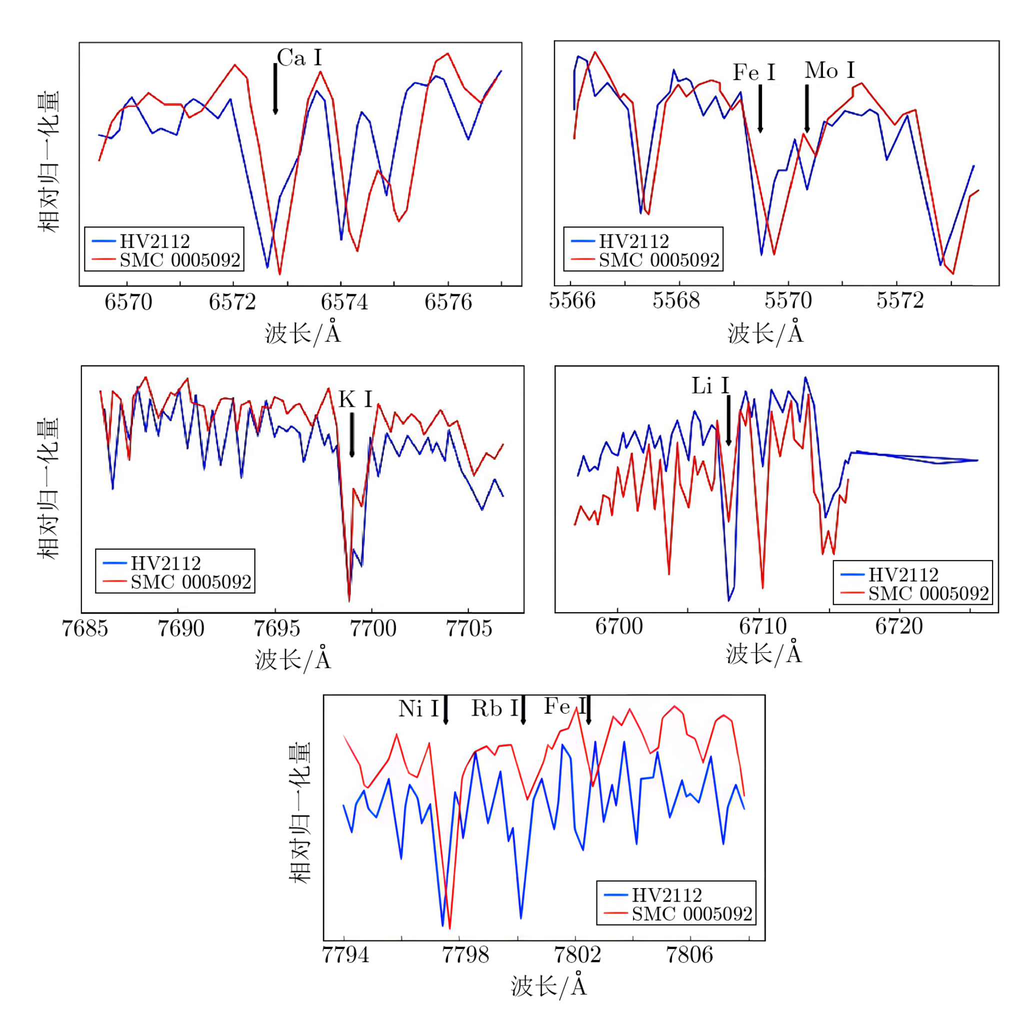


图 4　HV2112 样本丰度比例[4]

图 5 给出了 HV2112 和典型的 SMC 中的红超巨星的光谱，HV2112 的光谱有显著

的 TŻO 特征。虽然在有些恒星中能观测到 Mo 或 Rb 元素，并且他们的存在被归因于 s-process，但并没有先前的观测或预期的 s-process 理论过程能在一颗 Li 丰度额外高的星体上同时产生这两种元素。Li 的存在也提供了另一种论点，在温度低的进行 s-process 的星体中没有发现过同时存在的 Rb 和 Li 增强[31]。这三种元素同时出现也从来没有在任何 s-process 星体上观测到过。还可以进一步考虑 Ba II 吸收线的强度。由于 Ba 是 s-process 中非常普遍的产物，这提供了一种论证在 HV2112 中元素丰度的提升是否是由于 s-process 而不是 irp-process[32] 的方法，而 HV2112 中 Ba II 的强度与样本中其他 SMC 红超巨星相比并没有展现出更强的 s-process 的迹象。



注：其中红色为 SMC 0005092，代表的是典型的 SMC 中的红超巨星，有效温度为 3 475 K，蓝色为有效温度为 3 450 K 的 HV2112。

图 5　HV2112 光谱对比[4]

通过计算发现 $M_{\rm bol} = -7.82 \pm 0.2$，这与初始质量为 $15M_{\odot}$ 的红超巨星相契合，同时这

远超过 AGB 的最大质量上限。拥有相近轨道的大质量双星更常见于贫金属环境下[33]，这预测了 TŻO 的双星演化首先可能会出现在贫金属环境下，比如小麦哲伦星云。

然而，在观测到的 HV2112 的谱线比率中有一些与预期不符。尽管 Rb/Ni 在 HV2112 中的比率远远高于在 SMC 红超巨星中测到的，但 Rb/Fe 比率却正常。HV2112 中 Ni/Fe 的比率与红超巨星样本相比也很正常，这排除了过高的 Fe 丰度的可能性。Mo, Li 和 Rb 的特征也是一目了然，并没有显著提升到基于预测的 TŻO 中会出现的大量丰度的值[1,3,7,8]。这样相对微弱的元素提升可能暗示着 HV2112 正处于 TŻO 的早期或者其 TŻO 存在阶段非常短暂[7,8]。在 HV2112 中 Ca/Fe 的比率同样异乎寻常地高，但这个丰度比率的提升并没有与 TŻO 相联系的理论解释。

对于任何 TŻO 的确定性探测将为全新的恒星内部模型提供直接证据，同时能确认理论上预测的大型恒星双星系统的命运以及核合成环境的存在，这些环境为宇宙中重元素和 Li 的产生提供了新的渠道。但是，对于 HV2112，现今众说纷纭，除了 TŻO，接下来列举其可能的其他星体结构，虽然目前其主要争议结构为 TŻO 或 SAGB，但下文在对 HV2112 是否可能为 SAGB 结构进行分析的同时，依旧对 HV2112 是否有可能是 AGB 结构进行了分析并给出了扬弃原因。

3.2.3　HV2112 是 AGB 的论点

对于 HV2112 到底是否是 TŻO 依然还有很大的争议，有相关研究认为 HV2112 是一颗 AGB 而不是 TŻO。对于 HV2112 是 TŻO 的判断主要是基于星体具有 ($\lg(L/L_{\odot}) \geqslant 5$) 一个温度极低的表面，以及表面富含 Li, Ca 以及一系列 irp-process 元素。

一些新的研究宣称，在采用新观测方法后，发现 HV2112 的热光度在 $\lg(L/L_{\odot}) = 4.70 \sim 4.91$ 的区间内[34]，比之前的观测数据要低，且符合 AGB 的特征。通过将 HV2112 与 SMC 中晚型高光度的星体的光谱作比较后，并没有发现明确证据说明 Rb, Ca 或 K 的显著提高，但确实发现 Li 丰度的显著提高。因此认为这是一颗质量为 $5M_{\odot}$ 的 AGB。

在之前的研究中[4]，也能够明显地发现，Rb/Ni 的比率说明 Rb 的丰度有显著升高，而 Rb/Fe 的比率却很正常，同时 Ni/Fe 的比率也在正常范围内，这是不自洽的。另外在其研究中所选的其他样本的有效温度和 $\lg(g)$ 值是不一样的，而这些化学元素的丰度很可能对这些参数非常敏感。同时在之前研究中也说明了，谱线会被 TiO 的谱线覆盖产生空白，而谱线对有效温度和大气结构也非常敏感；因此也认为不能直接将 HV2112 认为是一颗 TŻO。

3.2.4　HV2112 是 SAGB 的论点

对于 HV2112 还有一种说法，由于它的光度接近或超过 $10^5L_{\odot}$，因此认为这也可能是一颗 SAGB，是由电子简并支撑 O/Ne 核并且正在经历第三次掘取阶段的热脉冲恒星。TŻO 和 SAGB 在宇宙中都非常罕见，迄今为止，HV2112 大气中的元素丰度并不能使用最新的模型来区分这两种可能性。Mo 和 Rb 的丰度提升可能是由 TŻO 中的 irp-process 提供，也有可能由 SAGB 环境中的 s-process 提供，Li 丰度的提升也有可能是共同包层中的底部热燃烧所导致的。但 SAGB 无法合成 Ca 元素，而 Ca 元素可能会在形成 TŻO 的最后阶段产生，因此 HV2112 中显著提升的 Ca 丰度很重要。

较早的研究[4]并没有清楚地讨论 SAGB 星的可能性。SAGB 是一些初始质量为 $8M_\odot \sim 10M_\odot$ 的恒星在演化的晚期，依赖于在 He 燃烧过程中对流超调的假设，在第二次掘取反应 (恒星演化深层的物质通过反应掘取到上层) 发生前点燃中心的 C 核[35]。中等质量的恒星通过在主序上 H 核燃烧而演化，当中心 H 耗尽时，H 燃烧移向壳，恒星变成红巨星。它的对流包层加深并掘取了一部分氢燃烧的产物到表面。当温度足够高时，3α 过程将使核心中的 He 燃烧，对流燃烧成 C 和 O。核心中的 He 耗尽后，在紧靠 H 燃烧产生的外壳中的外壳燃烧。这些双壳燃烧的恒星位于 AGB (渐近巨星分支) 上。在更大质量的 AGB 恒星中，当深层的对流包层渗透到暂时耗尽的 H 燃烧壳的时候，会发生第二次掘取反应。这会带来新的H燃料使得仅在 He 燃烧壳层外百分之几 $M_\odot$ 的 H 壳层再次点燃。富 He 区域的稀薄程度，加上 3α 反应的强烈温度敏感性，会导致脉冲中不稳定的 He 燃烧，在两次脉冲之间会发生第三次掘取反应，将 He 燃烧的产物带到表面，其中的慢中子俘获同位素能够解释在 HV2112 中观察到比 Fe 重的元素。更高质量的 SAGB 在第二次掘取发生之前会点燃 C 核，并会以类似的形式发生热脉冲并发生掘取反应过程。第二次掘取发生之前，SAGB 的核心质量更高，这会赋予它们早期接近红超巨星和 TŻO 的光度。一旦开始热脉冲和第三次掘取后，核心以及由此产生的光度将增长得更加缓慢。在观测到的所有化学元素丰度中，SAGB 和 TŻO 几乎都能说明丰度的增加，但 Ca 的增加是一个例外。

在宇宙中 SAGB 和 TŻO 都很罕见，在 SMC 的金属性下，SAGB 的形成质量在 $6.5M_\odot \sim 8M_\odot$，SAGB 的寿命很短，同时由于其前身星体的寿命也较短，因此几乎每 1 000 个符合质量的星体里只有一个 SAGB。在获取的大约 250 个年龄大约 300 Ma 的星团中，Glatt 等人[36]发现星团的平均质量约为 $4\,000M_\odot$，而只有在总质量约为 $10^6 M_\odot$ 的星团中才有可能诞生 SAGB。如果将这些数据整合，得到当前在 SMC 中 SAGB 的总数应为 1 左右。在此计算的精度范围内，这与 HV2112 是迄今为止在 SMC 中发现的唯一 SAGB 相吻合。

HV2112 拥有高的 Rb 和 Mo 丰度，这可以是由 TŻO 中的 irp-process 产生[3]，也可以由 SAGB 中的 s-process 产生[37]。后者最初会形成较轻的元素，其中 Rb 和 Mo 都是属于 s-process 中形成的较轻的元素。之后随着中子暴露程度，形成了包括 Ba 在内的较重元素。

现在将注意力转向 Li。Li 元素在 AGB 的演化早期能够通过热对流燃烧产生[38]。在第二次掘取反应发生后，SAGB 包层的基础温度能够达到 6×10^7 K，这能够产生热对流燃烧并合成 Li。首先，^{7}Be 能够由如下反应产生：

$$^3\mathrm{He} + ^4\mathrm{He} \longrightarrow ^7\mathrm{Be} + \gamma \quad . \tag{1}$$

然后 ^{7}Be 能够抓取一个电子形成 ^{7}Li，

$$^7\mathrm{Be} + \mathrm{e}^- \longrightarrow ^7\mathrm{Li} + \nu \quad . \tag{2}$$

热对流燃烧产生的一些 Li 能够通过对流传输到表面，因此在很短的时间内，Li 丰度会有显著提升，在许多模型中会提升 10 倍以上。那些混合或残留在热燃烧区域的 Li 随后会因质子捕获而破坏：

$$^7\mathrm{Li} + ^1\mathrm{H} \longrightarrow 2^4\mathrm{He} \quad . \tag{3}$$

当 ^{3}He 耗尽时 Li 的产生停止，因此表面上的 Li 丰度会在 AGB 早期阶段达到峰值后降低。

因为 Li 在任何热脉冲之前都会明显升高，所以 SAGB 的表面在 s-process 之前就已经富含 Li 了，在最初的几个脉冲中，s-process 中较轻的同位素元素被传输到表面，而大多数之前产生的 Li 会被毁坏。s-process 对元素的提升会持续 $10^4\sim10^5$ a[39]，取决于最初的质量和包层的对流。而同时富 Li 阶段在 $6M_\odot$ 中将会持续 10^5 a，这说明 Li 和 Rb 可以同时存在并具有比较高的丰度。

另一方面，TŻO 可以通过同样的机制合成 Li，在这种情况下，其场所在简并核上方的对流包层中，但由于对流的影响，不会产生式 (3) 的过程。对于一个标准模型，Li 丰度能够在开始 10^5 a 提升，并且能够在 10^6 a 后继续提升，超过了认为 TŻO 能够存在的最大寿命。因此在 TŻO 中同时发现 Rb, Mo 和 Li 也没有问题。

值得注意的是在 HV2112 中发现了 Ca 丰度的明显提升。Ca 的产生是在恒星核寿命的最后阶段，即光致蜕变过程中捕获 α 粒子产生的，而 α 捕获会在超新星爆发前将 Si28 转化为 Ni56。在 SAGB 和 TŻO 中都没有发现会增强 Ca 的核合成。而在 SAGB 的更早期中，也不会有任何时期能达到能从内部合成 Ca 的条件，因此只能解释为偶然的外部污染。

而对于 TŻO，有一种可能性是当简并的核与中子星合并时，吸积盘中的条件能够达到更高温度促成 Ca 的产生。Metzger[40] 计算出瓦解的白矮星产生的吸积盘在吸积过程中的核合成。对于一个 $0.6M_\odot$ 的白矮星 (这是他的模型中与 HV2112 最接近的模型)，大约 $10^{-3}M_\odot$ 的 Ca 会从吸积盘中逃逸出来；这超过了在 HV2112 表面上显著提升 Ca 丰度所需要污染包层的质量。即使考虑由星风所造成的质量流失，依然至少有 1/10 的 Ca 的质量会污染包层，这个图景符合所知道的其他具有相对论性吸积盘系统并能够解释 Ca 丰度的增加。但是这项研究依然有很大的不足，采用的 Metzger 的模型只是一个用于白矮星的模型，其只有中子星吸积的 1/10，并且这依赖于稳定的中子星会继续作为中心物体而不是坍缩成为黑洞这样的假设。

3.3　对麦哲伦星系中类似 HV2112 星体的观测分析

与此同时，也有研究者[41] 从另一个角度来探索 HV2112。HV2112 有 600 d 的光变周期，并且在周期中视星等会改变[42]。同时在一个周期内，HV2112 会出现两次峰值。根据这些特点，可以在 HV2112 所处的麦哲伦星系 (SMC和LMC) 中，通过类似的条件筛选到 11 个与 HV2112 各方面性质极其类似的星体 (HLOs)，并对它们的观测性质，物理性质，包括其产生率和寿命进行分析预测。

HLOs 的视星等振幅大于 2.5，周期大于 400 d，平均绝对星等处于 $-2.5\sim5$ mag 之间，其红外波段的颜色表明大气中富 O。HLOs 的有效温度为 $3\,250\sim3\,600$ K，光度 $\lg(L/L_\odot)$ 为 $4.15\sim5.15$，质量损失率为 $1\times10^{-7}M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}\sim4\times10^{-6}M_\odot\cdot\mathrm{a}^{-1}$，预期质量为 $6M_\odot\sim11M_\odot$。考虑到 HLOs 可能是 $6.5M_\odot\sim11M_\odot$ 的星体 (SAGB 演化路径) 或由大质量X射线双星系统 (TŻO 演化路径) 演化而来，HLOs 阶段的寿命为 10^4 a。这与 SAGB 阶段的预期寿命相符，比 TŻO 阶段的预期寿命小了一个数量级。

对 HLOs 的类别进行分析所得结论如下：(1) 由于 HLOs 的性质与 RSGs 的观测性质

(星等变化和颜色) 以及理论预测都有非常大的分歧，很明显 HLOs 应该不属于红巨星。(2) 通过与 AGB 性质的对比，发现样本中的一颗星体 (LMC-3) 非常符合，可以被认为是 AGB；而剩下的 10 个样本与 AGB 在许多性质上都不同，在质量和光度上都超过了典型的 AGB。(3) HLOs 的高光度和质量都与 SAGB 的预测相吻合，不过在 SAGB 演化的后期，会产生大量的质量损失率或超强星风，超过 $10^{-5}M_{\odot}\cdot\mathrm{a}^{-1}$[43]，这在 HLOs 中并没有发现，HLOs 展现出 $10^{-7}\sim10^{-8}M_{\odot}\cdot\mathrm{a}^{-1}$[43] 的损失率。Doherty 等人[39]提出，一个处于超强星风阶段的 SAGB 应该满足以下两个条件中的一种：具有超过 850 d 的周期，或者超过 500 d 的周期且 C/O 的比率应该大于 1。由于所有的 HLOs 周期都小于 850 d，并且根据红外波段的颜色表明其大气中富 O；因此 HLOs 可能还处在 C 核燃烧阶段，并没有到达超强星风阶段，在超强阶段之前，理论上的质量损失率是符合 HLOs 的。同时 HLOs 的当前质量和预期寿命都符合 SAGB 的演化预期。因此，如果 HLOs 处在超强星风前 C 燃烧阶段，那么它们与 SAGB 的预测相符，由于迄今为止只有一颗被证明的 SAGB 候选体，这一发现会大大增加已知的 SAGB 的数量。(4) HLOs 的有效温度、质量损失率、光度都与 TŻO 非常符合。然而在 TŻO 的预期与 HLOs 的观测中有一重大分歧，那就是一个稳定结构的大质量 TŻO 应不小于 $14M_{\odot}$[3]。而在脉冲模型中通过对 HLOs 光度、有效温度、周期进行分析显示，目前其质量为 $6M_{\odot}\sim11M_{\odot}$，低于质量下限。当一个大质量 TŻO 在低于其质量下限的情况下维持核聚变，它将经历中微子损失并最终破坏稳定性[7,8]。所以只有三种可能：大质量 TŻO 的质量下限需要被修正，观测到的 HLOs 质量被低估，或 HLOs 不是 TŻO。

4 结 论

4.1 讨 论

TŻO 是一种理论上预测的具有奇异性质的天体，由一颗红巨星以及其内部的中子星核组成。大质量 TŻO 的总质量不小于 $11.5M_{\odot}$，并主要由发生在对流包层基底的核合成反应提供能量。TŻO 被认为是由两颗距离非常近的大质量双星演化而成，当中子星形成的时候，另一颗更大质量的星体演化到红巨星阶段，在系统经历一系列演化后，伴星膨胀的包层会变成共同包层，中子星会旋进到其伴星的中心。还有另一种可能是中子星受到一个超新星爆发的作用力，而径直向其伴星方向移动并最终被吞并。

TŻO 的能量来源主要是由 irp-process 产生，因此相应会产生 irp-process 过程才会产生的独特元素。对于 TŻO 在宇宙中是否真实存在一直有争议，非常需要观测来解决，但由于 TŻO 的寿命非常短，形成条件也比较苛刻，因此 TŻO 的出现预计非常罕见，同时在观测上由于 TŻO 各方面都与红超巨星非常相似，对其进行甄别也是巨大的挑战，只有通过检测 TŻO 候选体的详细化学特征才有可能。如 irp-process 会产生的化学元素特征：Mo, Ru, Th, Pd, Ag，都会比正常情况下增强 1 000 倍以上，第二个特征元素是 Li 丰度的提高。

而在 Levesque 等人[4]针对 HV2112 的研究中，HV2112 有效温度约为 3 450 K，视星等为 13.7 mag，绝对星等为 –7.82 mag，超过了 SMC 中星体的林忠四郎极限，也超过了普通

AGB 的极限，并且由于所观测元素都是通过比率的对比来说明其中某一元素的高丰度，而并没有给出相应元素的具体数值是否达到了 irp-process 会产生的元素数量。使用比率造成了很多潜在的问题，例如，如果用来做对比的元素丰度本身就极低，就会使得试图证明的高丰度元素的丰度并没有特别高。与此同时，该研究的自洽性依然是个问题，不难发现相应元素之间的比例难以自圆其说，这也是通过元素之间的比率来说明元素丰度所造成的弊端。同时该研究也暴露了其他问题，例如，元素丰度的提升比预期的要小很多，虽然这也有可能是由于 HV2112 相对年轻造成的。另外，在该研究中发现的很高的 Ca/Fe 并没有在现在的模型中预测到。总之，现今最主要宣称 HV2112 为 TŻO 的研究有不少缺憾。

4.2　展　望

在未来的研究和探测中应当更加注重具体的丰度细节，探测 irp-process 会产生的元素以及子元素的消耗。以 HV2112 为例的典型候选体，被解释为 SAGB 和 TŻO 都并非没有争议。想要区分 TŻO 和 SAGB，与 SAGB 相关的 C 核燃烧产物 Mg 变得很关键，目前在这方面迫切需要对核坍缩进行观测分析。同时对于以前的研究也依然有进一步提升的空间，在未来通过具体的元素丰度代替元素之间的比率进行计算也会使得结果更令人信服，当然具体丰度的探测也有排除 HV2112 为 TŻO 的可能性，一切都等待着进一步的观测和探索。

另一方面 O'Grady 等人[41]从另一个角度探索 TŻO，指出了另一种可能性。值得注意的是 TŻO 在 $8.5M_{\odot} \sim 14M_{\odot}$ 之间存在质量沟壑，因此，能够发生 irp-process 反应的大质量 TŻO 的质量下限大于所有麦哲伦星云中的类 HV2112 星体。在目前的模型下，大质量 TŻO 的质量下限是由对流效率、混合长度 (MLT) 参数以及中子星的质量所共同决定的，Cannon[3]发现，能够通过调整给定的假设使质量下限达到 $10M_{\odot} \sim 11M_{\odot}$。但若要更进一步探索 TŻO，显然需要对对流模型进行更多更细致的修正。

同时需要指出的是，目前针对 TŻO 还没有一个与脉动周期直接相关的模型。因此如果想要更广泛的研究和观测，还需要探索出一个细致的能满足光度 $\lg(L/L_{\odot})$ 为 4.5 ~ 5.1 和周期大于 500 d 的恒星结构。

总而言之，希望通过这个综述让更多有实测能力的研究者知悉此天体，并投入观测时间寻找。也希望理论学者能对 TŻO 产生兴趣，因为在 1977 年被提出后，理论上对它形成的可能性、途径以及演化方式提出了诸多不同的模型与结论，尚需分析完善。而另一方面，由于它与红巨星或红超巨星在观测上有着非常类似的特点，想要找到并确认其候选体也非常具有挑战性，需要对其观测特征有成熟和详细的理论预测作为先行前提。TŻO 相关研究的未来充满着挑战，其对双星系统研究和恒星结构建模都有巨大的推动作用。无论是在理论还是观测上，更多的工作和探索都是不可或缺的。

参考文献：

[1] Throne K, Żytkow A N. APJ, doi:10.1086/181839, 1975, L199, L19
[2] Ruffert M, Müller E. A&A, 1990, 238: 116

[3] Cannon R C. MNRAS, 1993, 263: 817
[4] Levesque E M, Massey P, Żytkow A. N, et al. arXiv:1406.0001v1, 2014
[5] Bhattacharya D, van den Heuvel E P J. Phys.Rep, 1991, 203: 1
[6] Biehle G T. ApJ, 1994, 420: 364
[7] Cannon R C, Eggleton P P, Żytkow A N, et al. APJ, 1992, 386: 206
[8] Podsiadlowski P, Cannon R C, Rees M J. MNRAS, 1995, 274: 485
[9] Chevalier R A. ApJ, 1989, 346: 847
[10] Kasen D, Woosley S E. ApJ, 2009, 703: 2205
[11] Lovegrove E, Woosley S E. ApJ, 2013, 769: 109
[12] Quataert E, Kasen D. MNRAS, 2012, 419: L1
[13] Papish O, Soker N, Bukay I. arXiv:1309.3925, 2015
[14] Soker N. New A, 2004, 9: 399
[15] Soker N. New A, 2013, 18: 18
[16] Soker N. arXiv:1404.5234, 2014
[17] Thielemann F-K, Arcones A, K̈appeli R, et al. Progress in Particle and Nuclear Physics,2011, 66: 346
[18] Qian Y-Z. American Institute of Physics Conference Series, 2012, 1484: 201
[19] Winteler C, K̈appeli R, Perego A, et al. ApJ, 2012, 750: L22
[20] Taam R E, Bodenheimer P, Ostriker J P. ApJ, 1978, 222: 269
[21] Meier D L, Epstein R I, Arnett W D, et al. ApJ, 1976, 204: 869
[22] LeBlanc J M, Wilson J R. ApJ, 1970, 161: 541
[23] Woosley S, Janka T. Nature Physics, 2005, 1: 147
[24] Liu X W. arXiv:1207.4687, 2015
[25] De Luca A, Caraveo P A, Mereghetti S, et al. Science, 2006, 313: 814
[26] Garmire G P, Pavlov G G, Garmire A B, et al. IAU , 2000, 73: 350
[27] Li X D. ApJ, 2007, 666: L81
[28] Worley C C. arXiv:1602.08479, 2016
[29] Maccarone T J, de Mink S E. MNRAS, 2016, 458: L1
[30] McMillan P J, Church R. arXiv:1804.10192, 2018
[31] García-Hernández D A, et al. A&A, 2013, 555: L3
[32] Vanture A D, Zucker D, Wallerstein G. ApJ, 1999, 514: 932
[33] Linden T, Kalogera V, Sepinsky J F, et al. ApJ, 2010, 725: 1984
[34] Beasor E R, Davies B, Cabrera-Ziri I, et al. arXiv:1806.07399, 2018
[35] García-Berro E, Iben I. ApJ, 1994, 434: 306
[36] Glatt K, Grebel E K, Koch A. A&A, 2010, 517: 50
[37] Lau H H B, Dougherty C L, GilPons P, et al, eds. ASP Conf, 2011, 445: 453
[38] Cameron A G W. ApJ, 1955, 121: 144
[39] Doherty C L, GilPons P, Lau H H B, et al. MNRAS, 2014, 437: 195
[40] Metzger B D. MNRAS, 2012, 419: 827
[41] O'Grady A J G, Drout M R, Shappee B J, et al. arXiv:2008.06563v1, 2020
[42] Payne-Caposchkin C, Gaposchkin S. Smithsonian Contribution to Astrophysics, 1966, 9: 1
[43] Doherty C L, GilPons P, Siess L, et al. MNRAS, 2015, 446: 2599

The Observation and Research Progress on Thorne-Żytkow Objects

LIU Jian-yu, ZHANG Fan

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Recent gravitational wave detection efforts have yielded a variety of unexpected binary merger event types, revealing our ignorance regarding one of the more fundamental pillars of astrophysics —the binary evolution process. To make up for this shortfall, we have to not only rely on such rare transient events as binary mergers, but also other independent, more persistently observable inspirations. We introduce one such candidate in this review, namely the Thorne-Żytkow Objects (TŻO), that are hypothetical celestial bodies born when neutron stars sink into the centers of red giants and/or red supergiants, whose properties and inferred formation history would undoubtedly clue us in on the vitals of the progenitor binary. First, focus on the theoretical overview of the structure and evolution of massive TŻO; then focus on the observational findings of massive TŻO, especially HV2112 in the Small Magellanic Cloud; finally, summarize current related work.

Key words: Thorne-Żytkow Objects; neutron stars; binary evolution; red giants; red supergiants